

©М. Ю. Кріцак <https://orcid.org/0000-0003-1020-3584>

©Т. К. Головата <https://orcid.org/0000-0001-9989-6510>

©Т. І. Гаргула <https://orcid.org/0000-0003-3335-0501>

*Тернопільський національний медичний університет імені І. Я. Горбачевського МОЗ України,
Тернопіль, Україна*

МОРФОМЕТРИЧНІ ОСОБЛИВОСТІ М'ЯЗОВОЇ ЧАСТИНИ ДІАФРАГМИ ПРИ ДІЇ ВНУТРІШНЬОЧЕРЕВНОГО ТИСКУ: ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

РЕЗЮМЕ. Мета роботи – дослідити зміни морфометричних параметрів ребрової та поперекової частин діафрагми за умов дії пневмоперитонеуму з постійним внутрішньочеревним тиском 5 мм рт. ст. протягом 1, 3 та 5 годин.

Матеріал і методи. Експериментальне дослідження виконано на 55 статевозрілих щурах, яких утримували в умовах акредитованого віварію. Контрольна група включала 10 особин, морфометричні показники, якої брались за показник норми. Інші тварини увійшли у три дослідні групи: перша – 15 особин із тривалістю пневмоперитонеуму 1 година; друга – 15 тварин з тривалістю 3 години; третя – 15 щурів та 5 годин. У кінці експерименту проводили забір діафрагми із вивченням морфологічних та морфометричних параметрів.

Результати. У другій дослідній групі діаметр волокон збільшувався на 2,37 % і 3,09 % відповідно у ребровій та поперековій частинах. При цьому зростала площа саркоплазми в порівнянні з першою групою. Діаметр ядер також збільшувався на 3,03 % та 3,02 % від показника першої дослідної групи. Через 5 годин тривалості пневмоперитонеуму встановлено зменшення діаметра м'язових волокон обох частин діафрагми по відношенню до вимірів після 3 години – на 0,22 % і на 0,98 %, але їхні значення все ще перевищували відповідні показники у тварин першої групи – на 2,15 % і на 2,13 % відповідно. Подібна тенденція зазначена і при аналізі показників площі саркоплазми та площі ядра. Таке пропорційне збільшення параметрів саркоплазми і ядер майже не змінювало ядерно-саркоплазматичне відношення як у межах групи, так і по відношенню до показників після 1-ї години тривалості пневмоперитонеуму. Відносний об'єм пошкоджених м'язових волокон у ребровій частині перевищував вимірювання першої групи у 8,7 раза та у 2,0 рази – через 3 години, у ніжках відповідно у 5,7 та 1,7 раза.

Висновки. Пневмоперитонеум призводить до збільшення діаметра волокон, площі саркоплазми та ядра, та збільшення відносного об'єму пошкоджених м'язових волокон.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: пневмоперитонеум, діафрагма, щури, експеримент, морфометрія, лапароскопія.

Вступ. Сьогодні лікарі та пацієнти віддають перевагу лапароскопічній техніці, а не методиці відкритих операцій, через менший інвазивний характер, що забезпечує менший ризик небажаних результатів, таких як інфекція, кровотеча тощо, і коротший час загоєння та, відповідно, післяопераційного періоду. Традиційний підхід до лапароскопічної хірургії передбачає створення пневмоперитонеуму шляхом інсуфляції вуглекислого газу, тобто карбоксиперитонеуму, що дозволяє створити відповідний простір у черевній порожнині для маніпуляції інструментами та виконання всіх етапів операції. Частіше використовують термін «пневмоперитонеум» (ПП), що означає створення внутрішньочеревного тиску методом введення вуглекислого газу у черевну порожнину інсуфлятором. Однак з'являються дані про серцево-легеневу недостатність, пов'язану з наявністю цього газу в черевній порожнині, особливо при наявності довготривалого високого рівня абдомінального тиску, що спонукає до вивчення цієї потенційно небезпечної для життя причини [1].

Лапароскопічні методи продовжують удосконалюватись як з точки зору дизайну та функціональності хірургічних пристроїв, так і досвіду самих хірургів. Ця еволюція ще більше сприяла використанню лапароскопії як для малих, так і для складних операцій у черевній порожнині. В літературі є повідомлення про те, що сам вуглекислий газ призводить до порушення внутрішнього середовища черевної порожнини, що веде до змін у гемодинаміці, а саме до підвищення центрального венозного тиску, середнього артеріального тиску. Крім того, деякі дані свідчать про випадки загрозливих для життя станів, пов'язаних із ПП, включаючи ниркову дисфункцію [2], набряк легень і газову емболію [2, 3]. Технологія лапароскопічної хірургії різко розвинулася за останні 3 десятиліття та продовжує розвиватися. Однак набагато менше уваги приділялося тому, як зміна середовища лапароскопічної операції може покращити клінічні результати [1, 4].

Ведуться дискусії щодо виду газу для пневмоперитонеуму та про те, який показник рівня тиску

забезпечить оптимальний простір у черевній порожнині для оперативного втручання. Відомо, що за різної тривалості та рівня карбоксиперитонеуму відбувається різний вплив на органи черевної порожнини, сприяючи розвитку метаболічних процесів і навіть тромбоутворенню [5–7].

Вуглекислий газ, що вводиться в черевну порожнину, здійснює рівномірний тиск у всіх напрямках. Найважливішим слід визнати тиск на задню стінку черевної порожнини, де розташовані нижня порожниста вена та аорта, а також тиск у краніальному напрямку на діафрагму, що призводить до компресії грудної порожнини [3, 8, 9].

Відомо, що залишкова кількість вуглекислого газу між куполом діафрагми та печінкою може викликати післяопераційний больовий синдром в плечолопатковій зоні [10]. ПП за рахунок підйому діафрагми і обмеження екскурсії легень викликає підвищення внутрішньогрудного тиску [9]. З підвищенням рівня ПП серцевий викид падає, а системний опір судин – зростає. Це призводить до розвитку компенсаторної тахікардії, як загальної реакції на підвищений внутрішньочеревний тиск з метою компенсації зниженого ударного об'єму, спрямованого на нормалізацію серцевого викиду [5, 11].

Згідно з даними літератури, найпоширеніша лапароскопічна операція – холецистектомія – може бути успішно виконана за умови нижчого рівня ПП, ніж так званий стандартний рівень тиску в черевній порожнині, приблизно у 90 % людей, яким виконують лапароскопічну холецистектомію [6]. Тиск газу, який використовується для надування живота, зазвичай становить від 12 до 15 мм рт. ст. (стандартний тиск). Однак це спричиняє зміни в кровообігу та може завдати шкоди. Щоб подолати це, було запропоновано більш низький тиск, як альтернативу стандартному тиску [5, 6].

Мета – провести дослідження для визначення змін морфометричних параметрів ребрової та поперекової частин діафрагми за умов дії пневмоперитонеуму з постійним внутрішньочеревним тиском 5 мм рт. ст. протягом 1, 3 та 5 годин.

Матеріал і методи дослідження. Для досягнення вищезазначеної мети було проведено екс-

периментальне дослідження на лабораторних тваринах, яке проводилось відповідно до положень Європейської конвенції щодо захисту хребетних тварин, яких використовують в експериментальних та інших наукових цілях, від 18.03.1986 р., Директиви Ради Європи 2010/63/EU, Закону України «Про захист тварин від жорстокого поводження». Експериментальне дослідження виконано на 55 статевозрілих щурах репродуктивного періоду (6–8 місяців), масою тіла ($225,0 \pm 20,0$) грам, яких утримували в умовах акредитованого віварію на базі Тернопільського національного медичного університету імені І. Я. Горбачевського МОЗ України. Щурів поділили на 4 групи. Контрольна група включала 10 особин, морфометричні показники, якої брались за показник норми, так як на тваринах не відтворювали жоден патологічний процес. Решта тварин увійшли у дослідні групи (ДГ), які були розподілені за номерами: у I ДГ тривалість пневмоперитонеуму була 1 година; II ДГ – тривалість 3 години та III ДГ з тривалістю 5 годин. Кожна ДГ включала 15 випадковим чином вибраних особин. Експерименти проводили в першій половині дня в приміщенні при температурі 18–20 °С, відносній вологості 60–80 % і освітленості 200 лк. Евтаназію тварин здійснювали шляхом передозування Thiopental sodium з розрахунку 75 мг/кг маси тіла тварини внутрішньоочеревинно.

Усім тваринам ДГ перед створенням ПП було застосовано загальну анестезію розчином Кетаміну (90 мг/кг), для премедикації використовували розчин Ксилазину (10 мг/кг), який вводили за 15 хвилин перед кетаміном. Створення ПП відбувалося згідно авторського свідоцтва на твір № 126409 від 16 травня 2024 року [12], інсуфлятором KARL STORZ electronic laparoflator 264300 20 на рівні 5 мм рт. ст. і швидкістю подачі вуглекислого газу на рівні 0,1 л/хв, протягом 1, 3 та 5 годин відповідно до номера ДГ (рис. 1). Згідно проведених досліджень, такий рівень тиску у щурів відповідає тиску 7 мм рт. ст. у дорослої людини [13, 14]. Після експерименту проводили забір діафрагми щура відповідно до авторського свідоцтва на твір № 126059 від 29 квітня 2024 року [15].

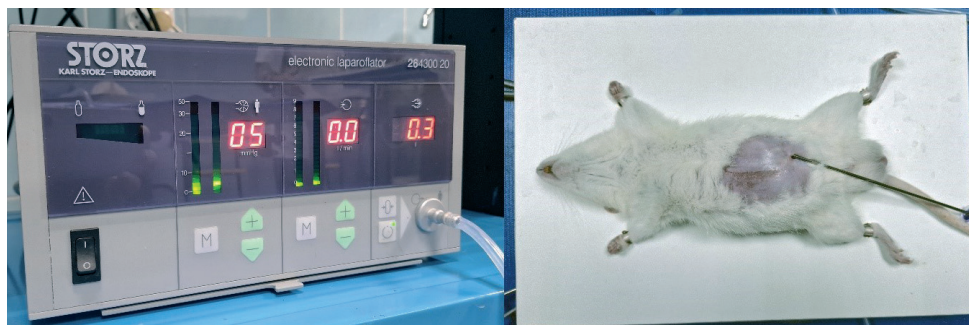


Рис. 1. Відтворення пневмоперитонеуму у щура за допомогою інсуфлятора із внутрішньочеревним тиском 5 мм рт. ст.

З макропрепарату виділяли окремо реброву та поперекову (ніжки діафрагми) частини діафрагми, які фіксували в 10 % розчині нейтрального формаліну. Після цього матеріал зневоднювали в етилових спиртах зростаючої концентрації та заливали у парафін. З кожного парафінового блоку на мікротомі виготовляли гістологічні зрізи, які після депарафінізації фарбували гематоксилином і еозинном, за методом Масона та толуюдиновим синім.

Обробка результатів виконана в програмному пакеті Statsoft STATISTICA. Вивчали: діаметр волокон; площу саркоплазми; площу ядер; ядерно-саркоплазматичне відношення; відносний об'єм пошкоджених м'язових волокон.

Результати. Отримані результати морфометричних вимірювань м'язових волокон частин діафрагми щурів усіх груп у кінці експерименту продемонстровано у таблиці 1.

Таблиця 1. Морфометрична характеристика м'язових волокон ребрової та поперекової частини діафрагми експериментальних груп (M±m)

Показник	Терміни дослідження							
	Контрольна група		I дослідна група		II дослідна група		III дослідна група	
	реброва частина	поперекова частина	реброва частина	поперекова частина	реброва частина	поперекова частина	реброва частина	поперекова частина
ДВ, мкм	40,37±0,08	40,46±0,11	40,41±0,17	40,48±0,08	41,39±0,25**	41,77±0,19***	41,30±0,30*	41,36±0,27*
ПС, мкм	1296,11±7,40	1297,42±8,77	1306,80±6,61	1307,78±4,87	1344,66±17,63**	1350,13±22,02*	1328,70±11,58	1330,70±18,87
ПЯ, мкм	62,36±0,04	62,36±0,05	63,13±0,11	63,15±0,11	65,10±0,20***	65,12±0,18***	63,61±0,12*	63,63±0,16*
ЯСВ	0,0481±0,0003	0,0481±0,0003	0,0483±0,0001	0,0483±0,0001	0,0484±0,0001	0,0482±0,0001	0,0479±0,0001	0,0478±0,0001
ВОПМВ, %	2,62±0,24	3,10±0,22*	5,44±0,13	8,72±0,14	23,71±0,55***	29,66±0,62***	47,54±0,46***	49,65±0,46***

Примітка: * – p<0,05; ** – p<0,01; *** – p<0,001 порівняно із I дослідною групою.

Порівняльний аналіз показників, отриманих через 1 годину створеного ПП в I ДГ із показниками контрольної групи (КГ) показав статистично недостовірну різницю параметрів. Так, діаметр волокон (ДВ) ребрової частини діафрагми (РЧД) зростав всього на 0,1 %, площа саркоплазми (ПС) – на 0,82 %, площа ядер (ПЯ) збільшувалася на 1,22 %, а ядерно-саркоплазматичне відношення (ЯСВ) – на 0,42 %. Аналогічна тенденція виявлена і в м'язах поперекової частини діафрагми (ПЧД).

Виняток складав показник відносного об'єму пошкоджених м'язових волокон (ВОПМВ), який становив (5,44±0,13) % у РЧД I ДГ а у КГ відповідний показник становив (2,62±0,24) %, що у 2,1 раза більше. Щодо цього показника у ПЧД, то спостерігалась така сама тенденція, спостерігалось збільшення на 181,29 % (з (3,10±0,22) до (8,72±0,14)) де p<0,001. Слід зазначити, що показник ВОПМВ у ПЧД КГ був у 1,2 раза більшим за показник РЧД КГ

(p<0,05). ЯСВ в обох частинах діафрагми I ДГ залишався однаковим. В подальшому ми порівнювали морфометричні параметри, отримані через 3 і 5 годин дослідження, із показниками зазначеними I ДГ.

Через 3 години відтворення ПП ДВ збільшувався на 2,37 % у РЧД (p<0,01) та з високою достовірністю (p<0,001) на 3,09 % у ПЧД. При цьому зростала ПС. У волокнах РЧД показник ПС був на 2,82 % більше (p<0,01) і зростав (з (1306,80±6,61) до (1344,66±17,63**)) мкм, в порівнянні з I ДГ. У волокнах ПЧД цей показник перевищував попередній на 3,14 % (p<0,001). ДЯ також збільшувався до 65,10±0,20 мкм у РЧД, що було на 3,03 % більше, ніж у I ДГ тварин (p<0,001) та до 65,12±0,18 мкм у ПЧД, що становило 3,02 % (p<0,001) від показника I ДГ.

Таке пропорційне збільшення параметрів саркоплазми і ядер майже не змінювало ЯСВ як у межах групи, так і по відношенню до показників

після 1-ї години відтворення ПП ($0,0484 \pm 0,0001$) і ($0,0482 \pm 0,0001$), відповідно, проти ($0,0483 \pm 0,0001$). Відносний об'єм пошкоджених волокон на цьому терміні у РЧД збільшувався, та був у 4,4 раза більшим за значення цього параметра І ДГ, а у ПЧД показник становив ($29,66 \pm 0,62$) % що у 3,4 раза більше від показника І ДГ ($p < 0,001$).

Через 5 годин тривалості ПП морфометричні виміри показали зменшення показника діаметра м'язових волокон обох частин діафрагми по відношенню до вимірів після 3-ї години – на 0,22 % у РЧД і на 0,98 % у ПЧД, але їхні значення все ще статистично достовірно ($p < 0,01$) перевищували відповідні показники у тварин І ДГ – на 2,15 % і на 2,13 % відповідно. Подібна тенденція зазначена і при аналізі показників ПС та ПЯ у ІІІ ДГ. Так ПС у РЧД становила ($1328,70 \pm 11,58$) мкм і це було на 1,19 % менше, ніж у ІІ ДГ, але на 1,65 % більше, ніж у І ДГ. Площа саркоплазми у м'язових волокнах поперекової частини дорівнювала ($1330 \pm 18,87$) мкм, це було на 1,44 % менше, ніж у ІІІ ДГ, але на 1,72 % більше, ніж у І ДГ.

ПЯ на зазначеному терміні дорівнював ($63,61 \pm 0,12$) мкм у РЧД і перевищував аналогічний І ДГ на 0,75 % і зменшувався на 2,29 % по відношенню до показника ІІ ДГ. ПЯ м'язових волокон ніжок діафрагми був на 2,29 % меншим, ніж у тварин ІІ ДГ але на 0,75 % меншим, ніж після І ДГ. Зазначені показники мали невисокий рівень статистичної достовірності ($p < 0,05$). ЯСВ при цьому зменшувалося як по відношенню до показників тварин І ДГ, так і по відношенню до показників тварин ІІ ДГ. Так, у м'язовій частині діафрагми значення ЯСВ становило ($0,0479 \pm 0,0001$), що було всього на 0,83 і 1,03 % менше аналогічних у попередніх групах. У м'язах ніжок цей параметр дорівнював ($0,0478 \pm 0,0001$) – на 1,04 і 0,83 % менше відповідних значень після 1-ї і 3-ї годин ПП. Наведені параметри відрізнялися статистично недостовірно ($p > 0,05$).

В обох досліджуваних частинах діафрагми через 5 годин тривалості ПП суттєво зростав показник відносного об'єму пошкоджених м'язових волокон. У ребровій частині він перевищував вимірювання через 1 годину у 8,7 раза та у 2,0 рази – через 3 години. У ніжках діафрагми різниця була у 5,7 раза та 1,7 раза відповідно. Між наведеними морфометричними параметрами встановлена статистично достовірна різниця ($p < 0,001$).

Обговорення. Як бачимо з наведених даних, найбільш страждає ПЧД, особливо відображає показник ВОПМВ, ми це пов'язуємо із тим, що ніжки діафрагми більш навантажені у функціональному плані, на відміну від ребрової частини. Щодо морфологічної картини, яку ми спостерігали в іншому нашому дослідженні, то ми виявили кореляцію гістологічних даних у дослідних групах

з більш вираженими змінами у групі, де відтворювали ПП протягом 5-ти годин [16]. У КГ м'язова частина представлена поперечно-посмугованими м'язовими волокнами, які утворюють щільний пласт. Товщина м'язових волокон дещо варіює, саркоплазма має світлий еозинофільний колір. Ядра подовжено-овальної форми розташовані під сарколемою.

Через 1 годину ПП гістологічна структура мало чим відрізнялася від результатів КГ тварин. Мікроскопічне дослідження через три години тривалості ПП показало, що у м'язових волокнах діафрагми спостерігали ознаки набряку та хвилеподібний хід волокон. Нерівномірне забарвлення саркоплазми з осередками вакуолізації, лізису та гомогенізації. Фрагментарна поперечна посмугованість. Ядра зміщувались у напрямку центру волокна. Повнокровність венозних судин. Місцями спостерігаються клітинні інфільтрати, представлені гістіоцитами та лімфоцитами. Відмічено осередки фрагментації волокон. В артеріолах та артеріях малого калібру спостерігалася десквамація ендотелію, що сприяло набряку усіх шарів стінки судин, вакуолізація гладких міоцитів [16].

Результати у групі, де відтворення ПП тривало 5 годин, показали поглиблення деструктивних змін у м'язовій частині діафрагми. М'язові волокна розташовувались компактно, але нерідко межі розмивалися і втрачалася диференціація із строною. В саркоплазмі інтенсивно еозинофільні ділянки чергувались із гіпохромними, на тлі цього наявна фрагментація, вакуолізація, глибокий розпад саркоплазми та міоцитоліз, поперечна посмугованість візуалізувалась фрагментарно або взагалі відсутня. В артеріолах мали місце набряк стінок, десквамація ендотелію та помірне кровонаповнення.

При аналізі літератури відмічено достатньо даних про вплив ПП на діафрагму, дихальну систему в цілому та інші органи черевної порожнини, проте даних про гістологічну структуру частин діафрагми після створення ПП майже немає [17]. В процесі експерименту, суттю якого було створення внутрішньочеревного тиску протягом різного часу з наступним вивченням гістологічної структури м'язової частини діафрагми, спостерігались зміни, яким притаманний розвиток гемодинамічних порушень, явищ дезорганізації волокнистих структур сполучної тканини, дистрофічних змін м'язової тканини, виникнення запальної реакції. Оцінюючи інтенсивність зазначених змін у експериментальних групах із різною тривалістю ПП можна простежити пряму залежність між вираженням структурних змін, морфометричних параметрів та тривалістю дії досліджуваного фактора на організм піддослідних тварин [16].

Податливість черевної порожнини має свої межі, є унікальною для кожного пацієнта, а криві тиск-об'єм нелегко передбачити. Використання найнижчого можливого тиску для виконання хірургічного завдання без шкоди для хірургічного результату є бажаною метою, тому нами вирішено вивчити структуру при нижчому тиску. Згідно з літературними даними, тиск у черевній порожнині більше 12 мм рт. ст. свідчить про наявність внутрішньочеревної гіпертензії. Клінічне значення полягає в обережності та знанні того, що існує точка, коли більший тиск не збільшує робочий простір, а лише збільшує тиск [17]. А вплив на діафрагму достеменно не вивчений.

Більшість досліджень, які спрямовані на виявлення морфологічних змін після пневмоперитонеуму, зосереджені на органах внутрішньочеревної порожнини. Внутрішньочеревний тиск 10 мм рт. ст. протягом 60 хвилин у щурів збільшував окислювальний стрес у кишковій тканині [18]. Інше дослідження оцінювало вплив інсуфляції при 4, 8 або 12 мм рт. ст. на кровотік нирок і печінки, на структуру яєчок, на швидкість регенерації печінки [19]. Було виявлено зниження ниркового кровотоку під час нагнітання CO₂, але це зниження було значущим лише в групі, яка була накачана до 8 і 12 мм рт. ст. Крім того, ці тиски не викликали змін у печінковому артеріальному кровотоці. Що стосується портального кровотоку печінки, пневмоперитонеуму 12 мм рт. ст. було достатньо, щоб викликати значне зниження [19]. Дані нашого дослідження свідчать про вплив ПП на діафрагму, і це потрібно враховувати в клінічній діяльності.

Висновки. Отримані результати свідчать, що створений експериментально пневмоперитоне-

ум впливає на морфометричні показники м'язової частини діафрагми і залежить від тривалості останнього. У дослідних групах відмічалось збільшення діаметра м'язових волокон, площі саркоплазми та ядра. Найбільші зміни спостерігали через 3 години тривалості пневмоперитонеуму. При цьому не змінюється ядерно-саркоплазматичне відношення. Відносний об'єм пошкоджених м'язових волокон відображав пряму залежність від тривалості патологічного чинника. Отже, пневмоперитонеум призводить до перебудови структурних компонентів діафрагми і порушення тканинного гомеостазу, які характеризуються нерівномірними змінами морфометричних параметрів поперечно-посмугованих волокон.

Джерела фінансування. Автори не отримували жодної фінансової підтримки для дослідження, написання чи публікації цієї статті. Автори не мають жодної фінансової зацікавленості та не отримали жодної фінансової вигоди від цього дослідження.

Внесок авторів:

М. Ю. Кріцак – розробка ідеї та дизайну дослідження, проведення огляду літератури, експериментальне дослідження, написання тексту.

Т. К. Головата – формування концепції дослідження, визначення показників з аналізом та обговоренням результатів, остаточне затвердження версії до друку.

Т. І. Гаргула – проведення експерименту, критична оцінка дослідження.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів, який міг би вплинути на об'єктивність або результати цього дослідження.

ЛІТЕРАТУРА

1. Low-pressure versus standard-pressure pneumoperitoneum in laparoscopic cholecystectomy: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials / Ortenzi M. et al. *Surg Endosc.* 2022. No. 36(10). P. 7092–7113. DOI: 10.1007/s00464-022-09201-1.
2. Clinical outcomes of low-pressure pneumoperitoneum in minimally invasive urological surgery / West A. et al. *J Robot Surg.* 2022. No. 16(5). P. 1183–1192. DOI: 10.1007/s11701-021-01349-7.
3. Low Pneumoperitoneum Pressure Reduces Gas Embolism During Laparoscopic Liver Resection: A Randomized Controlled Trial / Luo W. et al. *Ann Surg.* 2024. No.279(4).P.588–597.DOI:10.1097/SLA.0000000000006130.
4. Gas embolism under standard versus low pneumoperitoneum pressure during laparoscopic liver resection (GASES): study protocol for a randomized controlled trial / Jin D. et al. *Trials.* 2021. No.15; 22(1). P. 807. DOI: 10.1186/s13063-021-05678-8.
5. Effects of low intraperitoneal pressure and a warmed, humidified carbon dioxide gas in laparoscopic surgery: a randomized clinical trial / Matsuzaki S. et al. *Sci Rep.* 2017. No. 7(1). P. 11287. DOI: 10.1038/s41598-017-10769-1.
6. Comparison of inflammatory markers in low-pressure pneumoperitoneum with deep neuromuscular block versus standard pressure pneumoperitoneum among patients undergoing laparoscopic cholecystectomy for gallstone disease: a randomized control trial / Srikanth M. V. V. S. et al. *Surg Endosc.* 2024. No. 38(8). P. 4648–4656. DOI: 10.1007/s00464-024-11026-z.
7. Impact of low-pressure pneumoperitoneum on post-operative pain in robotic urological surgery: a systematic review / Baheer Y. et al. *J Robot Surg.* 2025. No.19(1). P. 72. DOI: 10.1007/s11701-025-02221-8.
8. On Behalf Of The IPPCoLapSe li Investigators. An Individualized Low-Pneumoperitoneum-Pressure Strategy

May Prevent a Reduction in Liver Perfusion during Colorectal Laparoscopic Surgery / Olmedilla Arnal L. E. et al. *Biomedicines*. 2023. No. 11(3). P. 891. DOI: 10.3390/biomedicines11030891.

9. Review of Outcomes of Low Verses Standard Pressure Pneumoperitoneum in Laparoscopic Surgery / Saway J. P. et al. *Am Surg*. 2022. No. 88(8). P. 1832–1837. DOI: 10.1177/00031348221084956.

10. Impact of Standard Versus Low Pneumoperitoneum Pressure on Peritoneal Environment in Laparoscopic Cholecystectomy. Randomized Clinical Trial / Serrano A. B. et al. *Surg Laparosc Endosc Percutan Tech*. 2024. No. 34(1). P. 1–8. DOI: 10.1097/SLE.0000000000001244.

11. Quality of recovery in patients under low- or standard-pressure pneumoperitoneum. A randomised controlled trial / Moro E. T. et al. *Acta Anaesthesiol Scand*. 2021. No. 65(9). P. 1240–1247. DOI: 10.1111/aas.13938.

12. Спосіб моделювання експериментального карбоксиперитонеуму у щура: свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 126409; опубл. 16.05.2024. 3 с

13. Tayfun Bilgic, Fehmi Narter. Effects of pneumoperitoneum with carbon dioxide on renal and hepatic functions in rats. *Videosurgery Miniinv*. 2020. No. 15(4). P. 574–582. DOI: 10.5114/wiitm.2020.93990.

REFERENCES

1. Ortenzi M, Montori G, Sartori A, Balla A, Botteri E, Piatto G, Gallo G, Vigna S, Guerrieri M, Williams S, Podda M, Agresta F. Low-pressure versus standard-pressure pneumoperitoneum in laparoscopic cholecystectomy: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Surg Endosc*. 2022 Oct;36(10):7092–7113. DOI: 10.1007/s00464-022-09201-1.

2. West A, Hayes J, Bernstein DE, Krishnamoorthy M, Lathers S, Tegan G, Teoh J, Dasgupta P, Decaestecker K, Vasdev N. Clinical outcomes of low-pressure pneumoperitoneum in minimally invasive urological surgery. *J Robot Surg*. 2022 Oct;16(5):1183–1192. DOI: 10.1007/s11701-021-01349-7.

3. Luo W, Jin D, Huang J, Zhang J, Xu Y, Gu J, Sun C, Yu J, Xu P, Liu L, Zhang Z, Guo C, Liu H, Miao C, Zhong J. Low Pneumoperitoneum Pressure Reduces Gas Embolism During Laparoscopic Liver Resection: A Randomized Controlled Trial. *Ann Surg*. 2024 Apr 1;279(4):588–597. DOI: 10.1097/SLA.0000000000006130.

4. Jin D, Liu M, Huang J, Xu Y, Liu L, Miao C, Zhong J. Gas embolism under standard versus low pneumoperitoneum pressure during laparoscopic liver resection (GASES): study protocol for a randomized controlled trial. *Trials*. 2021 Nov 15;22(1):807. DOI: 10.1186/s13063-021-05678-8.

5. Matsuzaki S, Vernis L, Bonnin M, Houille C, Fournet-Fayard A, Rosano G, Lafaye AL, Chartier C, Barriere A, Storme B, Bazin JE, Canis M, Botchorishvili R. Effects of low intraperitoneal pressure and a warmed, humidified carbon dioxide gas in laparoscopic surgery: a randomized clinical trial. *Sci Rep*. 2017 Sep 12;7(1):11287. DOI: 10.1038/s41598-017-10769-1.

6. Srikanth MVVS, Arumugaswamy PR, Rathore YS, Chumber S, Yadav R, Maitra S, Bhattacharjee HK, Aggarwal S,

14. Ilkben Gunusen, Ali Akdemir, Cevik Gurel. The Effects of Different Pressure Pneumoperitoneum Models Created By Standard or Heated-Humidified CO₂ Insufflation on Ovary and Peritoneum: an Experimental Study in Rats. *General Gynecology*. 2022. No. 29. P. 197–1208.

15. Спосіб відбору експериментального матеріалу діафрагми білих щурів: свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 126059; опубл. 29.04.2024. 3 с.

16. Дзюбановський І. Я., Головата Т. К., Кріцак М. Ю. Особливості морфологічних змін у поперековій частині діафрагми щурів: експериментальне дослідження. *Шпитальна хірургія, Журнал імені Л. Я. Ковальчука*. 2024. № 4. С. 62–69. DOI: 10.11603/2414-4533.2024.4.15072.

17. Ott D. E. Abdominal Compliance and Laparoscopy: A Review. *JSLs*. 2019. No. 23(1). P. e2018.00080. DOI: 10.4293/JSLs.2018.00080.

18. Strobel O. et al. Effect of a pneumoperitoneum on systemic cytokine levels, bacterial translocation, and organ complications in a rat model of severe acute pancreatitis with infected necrosis. *Surg Endosc*. 2016. No. 20 (12). P. 1897–1903. DOI: 10.1007/s00464-005-0417-x.

19. Effects of different pressure levels of CO₂ pneumoperitoneum on liver regeneration after liver resection in a rat model / Komori Y. et al. *Surg Endosc*. 2016. No. 28(8). P. 2466–2473. DOI: 10.1007/s00464-014-3498-6.

Asuri K, Kataria K, Ranjan P, Singh D, Singh A, Khan MA, Das SK. Comparison of inflammatory markers in low-pressure pneumoperitoneum with deep neuromuscular block versus standard pressure pneumoperitoneum among patients undergoing laparoscopic cholecystectomy for gallstone disease: a randomized control trial. *Surg Endosc*. 2024 Aug;38(8):4648–4656. DOI: 10.1007/s00464-024-11026-z.

7. Baheer Y, Isherwood L, Warner R, Teoh J, Decaestecker K, Dasgupta P, Tillinghast W, Trutza G, Vasdev N. Impact of low-pressure pneumoperitoneum on post-operative pain in robotic urological surgery: a systematic review. *J Robot Surg*. 2025 Feb 17;19(1):72. DOI: 10.1007/s11701-025-02221-8.

8. Olmedilla Arnal LE, Cambronero OD, Mazzinari G, Pérez Peña JM, Zorrilla Ortúzar J, Rodríguez Martín M, Vila Montañes M, Schultz MJ, Rovira L, Argente Navarro MP, On Behalf Of The IPPColLapSe li Investigators. An Individualized Low-Pneumoperitoneum-Pressure Strategy May Prevent a Reduction in Liver Perfusion during Colorectal Laparoscopic Surgery. *Biomedicines*. 2023 Mar 14;11(3):891. DOI: 10.3390/biomedicines11030891.

9. Saway JP, McCaul M, Mulekar MS, McMahon DP, Richards WO. Review of Outcomes of Low Verses Standard Pressure Pneumoperitoneum in Laparoscopic Surgery. *Am Surg*. 2022 Aug;88(8):1832–1837. DOI: 10.1177/00031348221084956.

10. Serrano AB, Díaz-Cambronero Ó, Montiel M, Molina J, Núñez M, Mendía E, Mané MN, Lisa E, Martínez-Botas J, Gómez-Coronado D, Gaetano A, Casarejos MJ, Gómez A, Sanjuanbenito A. Impact of Standard Versus Low Pneumoperitoneum Pressure on Peritoneal Environment in Laparoscopic Cholecystectomy. Randomized Clinical Trial. *Surg Laparosc Endosc Percutan Tech*. 2024 Feb 1;34(1):1–8. DOI: 10.1097/SLE.0000000000001244.

11. Moro ET, Pinto PCC, Neto AJMM, Hilkner AL, Salvador LFP, da Silva BRD, Souto IG, Boralli R, Bloomstone J. Quality of recovery in patients under low- or standard-pressure pneumoperitoneum. A randomised controlled trial. *Acta Anaesthesiol Scand*. 2021 Oct;65(9):1240-1247. DOI: 10.1111/aas.13938.
12. Kritsak MYu, Rosolovs'ka SO, Levchuk OI. Sposib modelyuvannya eksperymental'noho karboksypertyoneumu u shchura. Svidotstvo pro reyestratsiyu avtors'koho prava na tvir No. 126409 [Method of modeling experimental carboxyperitoneum in rats. Certificate of copyright registration for the work No. 126409]. 2024 May 16.
13. Tayfun Bilgic, Fehmi Narter Effects of pneumoperitoneum with carbon dioxide on renal and hepatic functions in rats. *Videosurgery Miniinv*. 2020;15(4): 574–582. DOI: 10.5114/wiitm.2020.93990.
14. Ilkben Gunusen, Ali Akdemir, Cevik Gurel. The Effects of Different Pressure Pneumoperitoneum Models Created By Standard or Heated-Humidified CO₂ Insufflation on Ovary and Peritoneum: an Experimental Study in Rats. *General Gynecology*. 2022;29:1197–1208.
15. Kritsak MYu, Slaby OB, Yasinovs'kyi OB. Sposib vidboru eksperymental'noho materialu diafrahmy bilykh shchuriv. Svidotstvo pro reyestratsiyu avtors'koho prava na tvir No. 126059. [Method of selecting experimental material from the diaphragm of white rats. Certificate of registration of copyright for the work No. 126059]. 2024 April 29.
16. Dziubanovskiy IYa, Holovata TK, Kritsak MYu. Osoblyvosti morfolohichnykh zmin u poperekovii chastyni diafrahmy shchuriv: eksperymentalne doslidzhennia [Features of morphological changes in the lumbar part of the diaphragm of rats: an experimental study]. *Hospital Surgery. Journal named by L.Ya. Kovalchuk*. 2024;4:62-69. DOI: 10.11603/2414-4533.2024.4.15072
17. Ott DE. Abdominal Compliance and Laparoscopy: A Review. *JSLs*. 2019 Jan-Mar;23(1):e2018.00080. DOI: 10.4293/JSLs.2018.00080.
18. Strobel O, Wachter D, Werner J, Uhl W, Müller CA, Khalik M, Geiss HK, Fiehn W, Büchler MW, Gutt CN. Effect of a pneumoperitoneum on systemic cytokine levels, bacterial translocation, and organ complications in a rat model of severe acute pancreatitis with infected necrosis. *Surg Endosc*. 2016 Dec;20(12):1897-903. DOI: 10.1007/s00464-005-0417-x.
19. Komori Y, Iwashita Y, Ohta M, Kawano Y, Inomata M, Kitano S. Effects of different pressure levels of CO₂ pneumoperitoneum on liver regeneration after liver resection in a rat model. *Surg Endosc*. 2016 Aug;28(8):2466-73. doi: 10.1007/s00464-014-3498-6.

M. Yu. Kritsak, T. K. Holovata, T. I. Gargula

Ivan Horbachevsky Ternopil National Medical University of the Ministry of Health of Ukraine, Ternopil, Ukraine

MORPHOMETRIC FEATURES OF THE MUSCULAR PART OF THE DIAPHRAGM UNDER THE ACTION OF INTRA-ABDOMINAL PRESSURE: AN EXPERIMENTAL STUDY

SUMMARY. The aim – to investigate changes in morphometric parameters of the costal and lumbar parts of the diaphragm under conditions of pneumoperitoneum with constant intra-abdominal pressure of 5 mmHg for 1, 3, and 5 hours.

Material and Methods. The experimental study was performed on 55 sexually mature rats, which were kept in an accredited vivarium. The healthy control group included 10 rats, morphometric indicators of which were taken as the norm. The remaining animals were divided into three experimental groups: the first group – 15 rats with a pneumoperitoneum duration of 1 hour; the second group – 15 animals with a duration of 3 hours; the third group – 15 rats with 5 hours of pneumoperitoneum duration. At the end of the experiment, the diaphragm was harvested followed by the study of morphological and morphometric parameters.

Results. In the second experimental group, the diameter of the fibers increased by 2.37 % and 3.09 %, respectively, in the rib and lumbar parts. At the same time, the area of the sarcoplasm increased compared to the first group. The diameter of the nuclei also increased by 3.03 % and 3.02 % compared to the indicators of the first experimental group. After 5 hours of pneumoperitoneum, a decrease in the diameter of the muscle fibers of both parts of the diaphragm was established in relation to measurements of the second experimental group – by 0.22 % and 0.98 %, respectively, but their values still exceeded the corresponding indicators in the animals of the first group – by 2.15 % and 2.13 %, respectively. A similar trend was noted when analyzing the indicators of the area of the sarcoplasm and the area of the nucleus. Such a proportional increase in the parameters of sarcoplasm and nuclei almost did not change the nuclear-sarcoplasmic ratio both within the group and in relation to the indicators of the first experimental group. The relative volume of damaged muscle fibers in the rib part exceeded the measurements of the first group by 8.7 times and by 2.0 times of the second group, in the legs – by 5.7 and 1.7 times, respectively.

Conclusions. Pneumoperitoneum leads to an increase in fiber diameter, sarcoplasmic and nuclear area, and an increase in the relative volume of damaged muscle fibers.

KEY WORDS: pneumoperitoneum; diaphragm; rats; experiment; morphometry; laparoscopy.

Отримано 11.04.2025

Електронна адреса для листування: kricakmy@tdmu.edu.ua